

УДК 621.926.5

**А.Н. Иванов, проф., д-р техн. наук,**

*Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры*

**С.А. Джирма, доц., канд. техн. наук,**

*Кировоградский национальный технический университет.*

## Влияние футеровки на эффективность работы трубных мельниц

Рассмотрена ликвидация мёртвой зоны шаров с помощью конструктивного оформления рабочей поверхности футеровки трубных мельниц.

**Футеровка, мельница, режимы работы, шаровая загрузка, коэффициент сцепления.**

Для предохранения корпуса трубных мельниц от износа их футеруют плитами из различных износостойких материалов и много внимания исследователи разных стран уделили именно вопросам повышения долговечности футеровочных плит. Однако, роль футеровки не только в этом, являясь конечным звеном передачи энергии падающих шаров измельчаемому материалу, она определяет угол отрыва шаров от футеровки и соответственно режим их работы. Достигается это за счёт конструктивных особенностей рабочей поверхности плит, которые характеризуются коэффициентом сцепления. Варьируя наборами плит с разными коэффициентами сцепления можно решать различные технологические задачи. По мере появления новых износостойких материалов с разными коэффициентами трения возможна замена плит сложных геометрических форм на технологические плоские гладкие ленты с заменой болтового крепления на более технологические способы.

Рассмотрим возможность ликвидации с помощью футеровки так называемой мертвой зоны из шаров. Известно, что мелющая загрузка состоит из шаров разного диаметра. Любой постоянный устойчивый режим работы мелющей загрузки, в каждом поперечном сечении по длине корпуса, приводит к поперечной сегрегации (расслоению) мелющих тел: мелкие шары располагаются на внешних траекториях ближе к футеровке, а крупные скапливаются в центре загрузки. Такая обратная по размерам сегрегация крайне нежелательна, так как крупные шары должны, наоборот, находиться на внешних траекториях и совершать ударный водопадный режим работы, в то время как, скапливаясь в центре загрузки они образуют малоэффективную "мертвую" зону. Кроме того, крупные частицы измельчаемого материала, также находятся в мертвой зоне, не выходят на поверхность и не измельчаются ударом, а измельчаются в неэффективном для них каскадном истирающем режиме. Все это приводит к значительным потерям энергии мелющих тел. Предпринимались различные попытки разрушения этой зоны. Так Эйгнер предложил оформлять "живое" сечение мельницы в виде правильного многоугольника. Разработана также спиральная футеровка с подъемными и отталкивающими ступенями. Но им свойственны общие недостатки: уменьшение рабочего объема помольных камер и необходимость изготовления новых типов футеровки.

Предлагается новый способ разрушения "мертвой" зоны, не требующий никаких дополнительных затрат. Суть его в том, что за один оборот мельницы загрузка работает не в одном каком-либо постоянном режиме работы, а в переменном: часть оборота в водопадном, часть – в каскадном. Для реализации этого способа используются

обычные бронеплиты или футеровка из элементов прокатного профиля с разным коэффициентом сцепления: гладкие бронеплиты имеют низкий коэффициент сцепления, равный коэффициенту трения загрузки по футеровке, а бронеплиты ступенчатые, гребенчатые, каблучковые, волнистые и др. имеют высокий коэффициент сцепления.

Футеруя мельницу по периметру чередующимися участками бронефутеровки, обеспечивающими переменным коэффициент сцепления, изменяем за один оборот, мельницы условия отрыва мелющих тел различных диаметров [1]. Шаровая загрузка работает в сложном водопадно-каскадном режиме, пульсирующем, при котором не происходит скопления крупных шаров в центре загрузки.

В развитие этого режима авторы предлагают следующее. Так как, в каждом поперечном сечении мельницы по ее длине есть одновременно и крупные и мелкие частицы, то необходимо, чтобы и мелющие тела работали в течение каждого оборота то в водопадном, то в каскадном режиме пропорционально количеству частиц, требующих измельчения ударом и истиранием. Соотношение количества этих частиц можно определить из диаграммы помола, построенной по остаткам на сите, размер ячеек которого соответствует граничному размеру частицы, требующей измельчения истиранием. Тогда ординаты под и над диаграммой помола покажут количество соответственно крупных и мелких частиц. Аналитически это можно записать, как

$$\frac{T_B}{T_K} = \frac{R}{R_0 - R}, \quad (1)$$

где  $T_B$  и  $T_K$  – время работы мелющих тел за один оборот корпуса мельницы соответственно в водопадном и каскадном режимах в любом искомом поперечном сечении,

$R_0$  и  $R$  – весовые остатки измельчаемого материала (%) соответственно в начальном и любом искомом поперечном сечении по длине мельницы в пробах на сите, размер которого отвечает размеру частиц, требующих измельчения истиранием. Для клинкера значение граничного размера в среднем составляет 0,5 мм.

Рассмотрим закономерность изменения режимов работы как за время одного оборота корпуса, так и по длине мельницы. На рис. 1 дана диаграмма помола по остаткам на сите 05. Начальное количество крупной фракции  $R_0$ . Вес крупных частиц текущего контроля определяется процентным содержанием остатка  $R$  в пробе на контрольном сите, а вес мелких частиц, прошедших через сито, равен  $R_0 - R$ .

Высота ординат  $H_i$  диаграммы помола мельницы непрерывного действия длиной  $L$  показывает количество крупных частиц в рассматриваемом сечении, а величина  $h_i$  – мелких частиц. Сумма ординат  $H_i + h_i = R_0$ . Величину  $R$  можно определить, зная аналитическое выражение для описания диаграмм помола. Тогда

$$T_B / T_K = \frac{R_0 \cdot e^{-kL^m}}{R_0 - R_0 \cdot e^{-kL^m}}. \quad (2)$$

Поскольку  $R$  представляет на рис. 1 ординату  $H_i$ , характеризующую количество крупных частиц (требующих измельчения ударом, т.е. водопадного режима), то время работы мелющих тел в водопадном режиме  $T_B$  за один оборот мельницы будет составлять от времени полного оборота мельницы  $T$  часть, пропорциональную  $H$ . Естественно, остальную часть оборота загрузка должна работать в каскадном режиме.

Очевидно, что также (рис. 1) величина  $T_K$  пропорциональна величине  $h_i$ , характеризующей количество мелких частиц (требующих измельчения истиранием).

Вопрос реализации решается за счет определенного чередования футеровочных плит с высоким и низким коэффициентом сцепления по отношению к мелющей

загрузке. Известно, что для создания водопадного режима работы с целью измельчения крупных частиц ударом в первых камерах трубных мельниц устанавливают футеровочные плиты с высоким коэффициентом сцепления, т.е. профиль рабочей поверхности их имеет выступы различной формы (волнистые, ступенчатые, гребенчатые, кулачковые, планочные и т.п.). Во вторых камерах для создания каскадного режима с целью тонкого измельчения материала применяют плиты с низким (минимальным) коэффициентом сцепления, дающие максимальное скольжение загрузки. Это гладкие цилиндрические плиты.

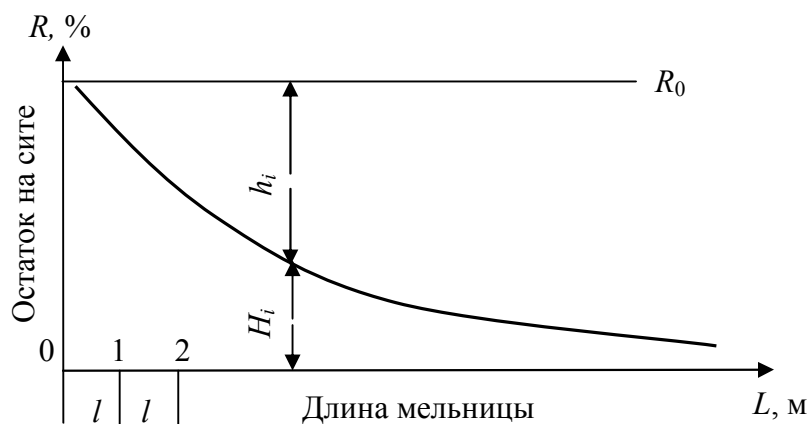


Рисунок 1 - Диаграмма помола по остаткам на сите 05.

Таким образом, если по длине окружности барабана установить с определенным чередованием различное количество плит с высоким и низким коэффициентом сцепления, то за один оборот барабана мелющие тела будут работать часть оборота в водопадном (при контакте с участком плит с высоким коэффициентом сцепления) и часть оборота в каскадном режиме. Поскольку за время одного оборота  $T$  барабан мельницы диаметром  $D$  поворачивается на  $360^\circ$  и совершает путь длиной  $\pi D$ , то, используя прежние значения, имеем

$$T_B / T_K = l_B / l_H = \gamma / \theta = H_i / h_i = \frac{R_0 \cdot e^{-kL^m}}{R_0 - R_0 \cdot e^{-kL^m}}, \quad (3)$$

где  $l_B$ ,  $\gamma$ ,  $l_H$ ,  $\theta$  – соответственно длины и углы секторов участков плит с высоким и низким коэффициентом сцеплений.

На рис. 2 даны сечения по длине мельницы АА и ББ, причем сечения АА даны в различных положениях вращения мельницы.

Как видно из рис. 2 (сечение АА) футеровка состоит из участков 1 с плитами высокого коэффициента сцепления и участков 2 с плитами низкого коэффициента сцепления. Длину  $l_B$  участка 1 (определяемую углом  $\gamma$ ) и длину  $l_H$ , участка 2 (с центральным углом  $\theta$ ) находим используя (3) для любого участка по длине мельницы  $L$ .

Определив по формуле (3) значение  $T_B$  из соотношения  $T_B/T = l_B/\pi D$ , можно определить  $l_B$ , а зная  $T_K = T - T_B$ , затем по (3) найти  $l_H$  или из  $T_K/T = l_H/\pi D$ .

В зависимости от того, на какой футеровке (с высоким или низким коэффициентом сцепления) находятся шары, они поднимаются на разную высоту и работают в разных режимах в течение каждого оборота мельницы, что создает пульсирующее движение шаров и разбивает мёртвую зону.

Значения  $l_B$  и  $l_H$  можно определить и графически из диаграммы помола, которая имеется для каждой работающей мельницы. Для этого измеряют  $H_i$  и  $h_i$  и проставляют

их в зависимость  $l_B/l_H = H_i/h_i$ . Минимальное значение  $l_B$  или  $l_H$  принимают равным  $\pi D/(8 \div 12)$ , что объясняется следующим. Согласно выполненным нами расчетам и полученным опытным путем данным, для полного проявления водопадного или каскадного режима угол футеровки  $\gamma$  или  $\theta$  участка плит с высоким или низким коэффициентом сцепления должен быть не менее  $30-45^\circ$ , что соответствует  $1/(8 \div 12)$  длине окружности или по времени  $T/8 \div 12 \approx 0,125 - 0,083T$ .

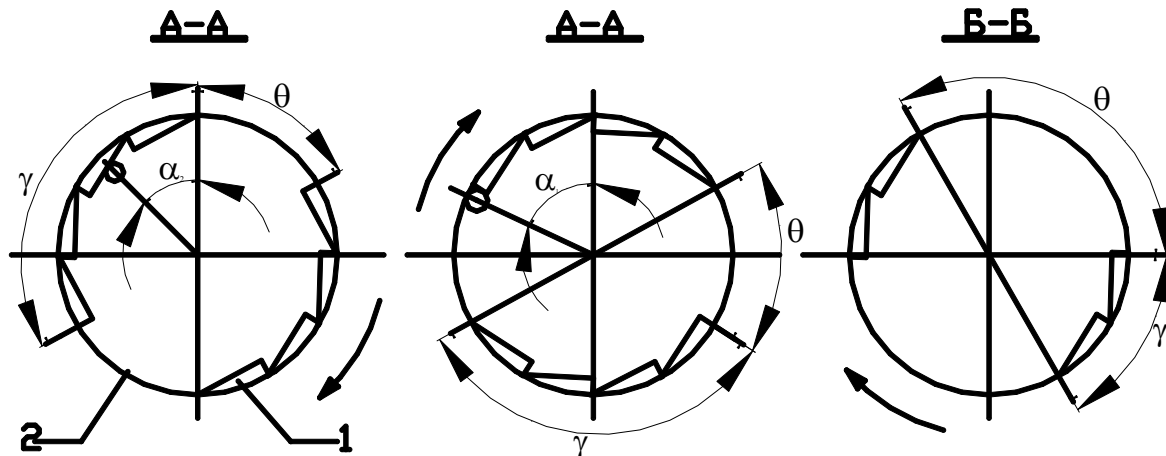


Рисунок 2 - Схема чередования участков футеровки по длине мельницы.

Поскольку по длине мельницы число крупных частиц уменьшается, то соответственно величины  $H_i$  и  $l_B$  снижаются (рис. 2). Там, где  $\gamma$  или  $\theta$  получается меньше -  $30^\circ$  ставят по всей длине окружности плиты одного коэффициента сцепления. Так, в начале мельницы полностью ставят только плиты с высоким коэффициентом сцепления, а в конце - с низким.

В случае использования рассматриваемого варианта реализации с помощью футеровки это делается ступенчато, от кольца к кольцу, поскольку футеровочные плиты устанавливаются в мельнице рядами колец. Тогда значения  $H_i$  и  $h_i$  надо брать для средних точек габарита длины плиты, т.е. в середине каждого кольца. Естественно, что полученные значения  $l_B$  и  $l_H$  округляют до величин, определяемых целым числом плит в каждом участке.

Таким образом, длину мельницы  $L$  в формуле (3) можно выразить через длину  $l$  как

$$L = l(n + 1/2), \quad (3)$$

где  $n$  – порядковый номер рассматриваемого ряда кольца футеровки, отсчитываемый со стороны загрузки мельницы, начиная с “0”.

Ликвидация мёртвого ядра значительно повышает эффективность работы мельницы.

## Список литературы:

1. Пат. 50843 Україна, B02C23 / 06. Спосіб помелу матеріалів в трубних млинах. / Іванов А.М. (Україна) № 000020953; Заявлено 21.02.2000; Опубл. 15.11.2002. Бюл. № 11. - 4 с.

Розглянута ліквідація мертвої зони куль за допомогою конструктивного оформлення робочої поверхні футерівки.

The liquidation of spherical dead area with the help of constructional design of a working surface of lining of tube mills is reviewed.